ISSN 1561-5359. Штучний інтелект, 2018, № 4

УДК 004.93

Ю.В. Крак[1,2], В.О. Кузнєцов[1]
[1]Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Україна
пр. Глушкова, 40, м. Київ, 03680
[2]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна
вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01601

АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМОЦІЙНОЇ МІМІКИ НА ОБЛИЧЧІ ЛЮДИНИ

[1]Hlushkov Institute of Cybernetics NAS Ukraine, Ukraine
40, Hlushkov Ave., Kyiv, 03680
[2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine
60, Volodymyrska St., Kyiv, 01601

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PARAMETRIC MODELS FOR INVESTIGATION OF EMOTIONAL EXPRESSIONS ON THE HUMAN FACE

У роботі розглянуто проблему розробки параметричної моделі мімічно-м’язової структури обличчя для просторового моделювання мімічних рухів на обличчі. Розглянуто існуючі фізичні і параметричні моделі, що описують деформації обличчя. Запропоновано модель деформації поверхні обличчя із використанням характерних точок скалярного поля деформацій поверхні. Формалізовано набір антропометричних ознак на обличчі для задачі синтезу емоційної міміки на основі аналізу моделі. Наведено приклади застосування параметричної моделі для задачі просторового моделювання мімічних проявів емоцій.

Ключові слова: параметричні моделі, емоційна міміка, синтез мімічних проявів

The paper considers the problem of synthesis of a parametric model of the facial muscular structure of the face for facial expressions modeling. The set of existing physical and parametrical models was discussed in the article. A model of the surface deformation of the face using characteristic points of the scalar field of surface deformations is proposed. The set of anthropometric features on the face was formalized for the task of synthesizing emotional facial expressions based on the analysis of the model. A bunch of examples was provided to describe applications of model proposed.

Keywords: parametric models, facial expressions, facial expression synthesis

Вступ

З розвитком людино-машинних інтерфейсів виникла гостра потреба в інтенсифікації спілкування людини з комп’ютером і, як наслідок, появи нових інтерфейсів, зокрема таких, що враховують виразність і експресивність повідомлення [1], що отримало в наукових дослідженнях назву affective computing [2]. Однією з проблем, з якою стикаються розробники нових інтерфейсів, є аналіз і ідентифікація невербальних елементів на обличчі, використовуючи інформацію з відеопотоків або фотографій [3].

Відзначимо, що засобами невербального каналу передачі даних у деяких випадках, зокрема при спілкуванні мовою жестів, може передаватися більше ніж 50% інформації [4], на відміну від письмових і вербальних засобів. Тому дослідження можливостей цього каналу в контексті розробки сучасних віртуальних середовищ комунікації і розвитку технологій є важливим для покращення якості спілкування та взаєморозуміння між людьми. Сучасні тенденції комунікації характеризуються зменшенням частки між особистим спілкуванням і підміною його засобами віртуального спілкування, які передбачають передачу невербальної інформації у максимально стиснутому форматі (короткі мобільні повідомлення, електронна пошта). Це призводить, у свою чергу, до зменшення розміру повідомлення та втрати частини інформації і, як наслідок, до погіршення якості спілкування.

Цілком зрозуміло, що вирішення цієї проблеми є важливим кроком у покращен-

ні формалізації процесів мислення, відчуттів та емоцій людини. Однак, крім соціальної направленості досліджень, не менш важливими є інші *результати*, пов'язані з подальшим розвитком штучного інтелекту [5], лінгвістики [6], психології [7].

Яскравим *прикладом* отриманих результатів є:

- покращення розуміння семантики мов, елементами яких виступають мімічні прояви [4];
- побудова математичних моделей і алгоритмів, що описують процес відтворення міміки на обличчі [8];
- розвиток технологій і методів розпізнавання образів на основі певного набору ознак [9].

Окрема частина таких досліджень була *проведена раніше* і торкалася:

- питань розробки елементів комп'ютерної анімації для системи моделювання Української жестової мови [10];
- питань відтворення мімічних проявів емоцій у задачах моделювання мови жестів [11];
- аналізу технологій розпізнавання елементів жестового мовлення із застосуванням систем просторового зору [12];
- аналізу технологій моделювання і розпізнавання мімічних проявів та їх практичного застосування [13].

Виходячи із актуальності і проблематики досліджень мімічних проявів, запропоновано *виконати наступні задачі*:

- створити математичну формалізацію мімічних проявів емоцій на обличчі людини, що описує зміни (деформації) структури обличчя;
- для оцінки адекватності запропонованої моделі, навести приклади застосування моделі для задачі просторового моделювання рухів обличчя.

Формалізація мімічних проявів

Одним із шляхів формалізації мімічних проявів є використання моделей деформації, що пов'язують зміни мімічно-м'язової структури обличчя і поверхні шкіри через певні параметри чи функціональні залежності. Моделі деформації розвивалися за двома напрямками: параметричні та фізичні.

Параметричні моделі ставили у відповідність змінам керуючих параметрів (через це вони назвалися параметричними) зміни елементів поверхні, що виражалися функціональними залежностями. Важливим дослідженням у цьому напрямку була робота Уотерса (Waters K.) [14], в якій рухи м'язів моделювалися аналітичними функціями розподілу деформацій по поверхні на основі функції косинуса. Подальшим розвитком напряму стала робота [15], автори якої застосували багатошарову параметричну модель, у якій були пов'язані рухи м'язів та поверхні шкіри. Виходячи із того, що аналітичні функції дуже наближено описували рухи поверхні обличчя, логічним наслідком цих розробок стали більш деталізовані фізичні моделі.

Фізичні моделі відрізнялися за рівнем своєї деталізації і математичними моделями (із інших галузей фізичного моделювання). Найбільш відомими і застосовними були механічні моделі типу «маятник-пружина» та окрема група методів, що була побудована на мережах скінченних елементів, кожен з яких являв собою елемент поверхні м'яза або шкіри. Серед досліджень у цьому напрямі відзначимо роботу Уотерса і Фрісбі (Waters K., Frisbie J.) [16], де було запропоновано для моделювання зовнішньої артикуляції губ використати мережу елементів «маятник-пружина». Розвитком цієї моделі стали більш складні мережі [17], які, окрім мережі, що моделювала деформацію шкіри, містили додаткові шари: жировий прошарок та м'язи, що мали відмінні властивості пружності і дозволяли краще описати рухи обличчя. Із розвитком комп'ютерних систем, що дозволяють вирішувати великі за обсягом обчислення, було створено декілька реалізацій моделей деформації на основі диференціальних рівнянь другого порядку: серед них варто відзначити роботу Коха та ін. (Koch R.M. et al) [18], у якій застосовувався метод скінченних елементів для розрахунку деформації окремих м'язів.

Прикладом такої фізичної моделі є математична модель деформацій м’яза, яка передбачає, що рух описується диференціальним рівнянням другого порядку:

$$m_i\chi'' + \chi_i' + g_i + q_i = f_i\ , \qquad (1)$$

де лінійні елементи g_i та q_i відповідають за початкове скорочення м’яза при нульових умовах, похідна першого порядку χ_i' – за швидкість скорочення, а похідна другого порядку χ'' – за прискорення.

У результаті розв’язку рівняння (1) отримується один або декілька окремих частинних розв’язків, на основі яких обраховуються числові характеристики деформації.

Синтез моделей деформації із застосуванням методів формалізації і локалізації антропометричних ознак

Розглянемо модель деформації окремого м’яза. Нехай існує відображення (проекція), що перетворює множину точок поверхні обличчя X у множину точок плоского або просторового зображення Y:

$$X \rightarrow Y. \qquad (2)$$

Для кожного елемента зображення y_i, що має певну координату у вигляді пари <p', q'>, можна (при задоволенні умови, що даний елемент видимий на зображенні) поставити у відповідність елемент поверхні обличчя x_i із координатою <p, q> відносно точки відліку.

Нехай на між двома окремими станами обличчя у два фіксовані моменти часу та відповідними їм зображеннями можна отримати два відображення:

$$X_1 \rightarrow Y_1, X_2 \rightarrow Y_2. \qquad (3)$$

Тоді нехай між зображеннями Y_1 та Y_2 можна обчислити величину оптичного потоку I', яка випливає із розв’язку рівняння:

$$I_p'\, p_t' + I_q'\, q_t' = -I_t', \qquad (4)$$

де I_p', I_q' – перші похідні оптичного потоку I по координатах p та q, а p_t' та q_t' – похідні p та q по t (час) відповідно.

Виходячи з існування двох відображень Y_1, Y_2 і диференційованості відображення в Y, можна припустити існування відображення оптичного потоку, таке що відображає зображення I оптичного потоку на поверхні в образ I':

$$I \rightarrow I', \qquad (5)$$

для якого справджується рівність (4) за умови рівності величини інтервалу часу в обох випадках.

Нехай I відображає скалярне поле деформацій поверхні обличчя. Тоді можна стверджувати, що величина ΔI є градієнтом скалярного поля, а Δp та Δq проекціями поля деформацій на відповідні криволінійні вісі координат поверхні.

Нехай спостережувана деформація, яка виражена градієнтом та проекціями, викликана скороченням одного м’яза, а для даного поля деформацій можна побудувати ізолінії і нормалі деформації.

Тоді нехай існує відображення n, що перетворює пару криволінійних координат p, q на пару координат n та m:

$$X(p, q) \rightarrow X(n, m), \qquad (6)$$

що відповідають нормальному (n) та дотичному (m) напрямку видовження м’яза відповідно.

Нехай існує деяке перетворення відображення, яке перетворює деформацію поверхні шкіри у нормальному напрямку на деформацію видовження м’яза ΔL та деформацію зміни товщини м’яза в осьовому напрямку Δr, такі що:

$$\Delta n \rightarrow \Delta L,\ \Delta m \rightarrow \Delta r. \qquad (7)$$

Тоді для кожного з цих відображень можна встановити зв'язок через елемент поверхні дотику м’яза зі шкірою ΔS і елемент поперечного перерізу ΔS_n.

Отже, перетворення деформації м’яза у деформації поверхні можна записати наступним чином:

$$\Delta L \rightarrow \Delta S,\ \Delta L \rightarrow \Delta S_n, \qquad (8)$$

що перетворює видовження м’яза у зміну його поперечного перерізу і поверхні дотику (рис. 1).

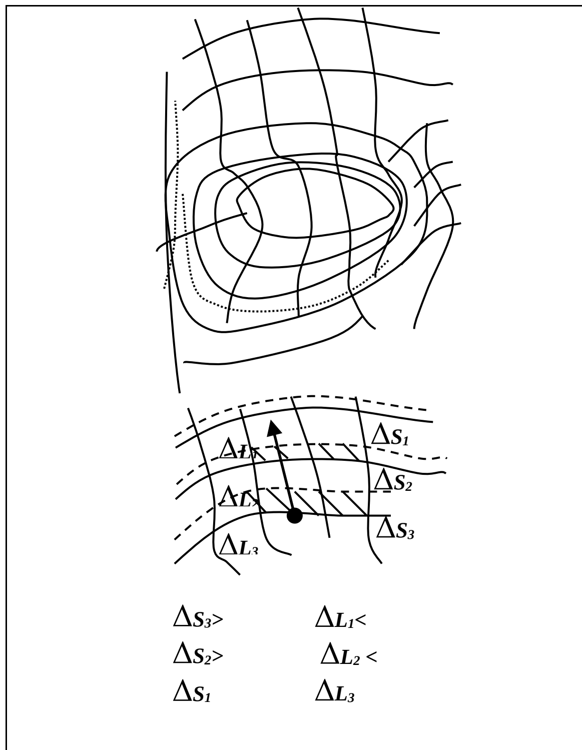


Рис. 1. Фрагмент поверхні обличчя в області лоба; деформації зміни площі поверхні ΔS_1- ΔS_3 та видовження ΔL_1- ΔL_3, а також основний напрямок деформації при піднятті брів угору

Отримані відображення можна розкласти в базисі локальних координат відносно точки закріплення м’яза наступним чином:

$$\Delta S_m \rightarrow \Delta m, \Delta S_n \rightarrow \Delta n \ , \qquad (9)$$

що перетворює зміну поверхні дотику і поперечного перерізу у деформацію шкіри в дотичному і нормальному напрямках.

З існування відображень (7)-(9) випливає також існування наступних відображень:

$$\Delta L \rightarrow \Delta n, \Delta r \rightarrow \Delta m, \qquad (10)$$

що перетворюють видовження м’яза на деформацію поверхні шкіри в нормальному і дотичному напрямках.

Припустимо, що зміну товщини м’яза можна виразити через ΔL деякого відображення. Тоді попередні два відображення можна переписати як:

$$\Delta L \rightarrow (\Delta n, \Delta m). \qquad (11)$$

Це відображення описує деформації поверхні шкіри в околі точки вкраплення м’яза, виражені через видовження (скорочення) м’яза.

Визначити величину руху окремого м’яза можна шляхом виконання послідовності перетворень, що перетворюють зображення поверхні обличчя у її координати обличчя, а координати у відносне видовження (відносно максимального), таке що:

$$\Delta Y(p', q') \rightarrow \Delta L. \qquad (12)$$

Тоді для миттєвого стану шляхом інтегрування по величині часу t можна отримати наступне відображення:

$$Y(p', q') \rightarrow L. \qquad (13)$$

Поле деформацій елементів м’яза та його характеристики

Для обчислення деформації елементів поверхні шкіри запропонована наступна формалізація. Оскільки в математичній моделі деформації виражені через скалярне поле, то такому полю властиві усі характеристики, які мають інші поля (електричне, магнітне, гравітаційне).

Найважливішою характеристикою цього поля є ізолінія – множина точок поля, що мають однакову характеристику прояву (в даному випадку величини деформації) відносно максимуму (або максимумів). Оскільки таких ізоліній може бути безліч, достатньо буде розглянути лише частину із деяким кроком.

Розташування ізоліній унікальне для будь-якого прояву як і для комбінації окремих проявів, проте їм властиві деякі особливості, пов’язані із будовою самих м’язів та поверхні шкіри, яку деформують.

Для можливості формалізації опису введемо абстракції – лінія поверхні, нормаль та дотична. Лінія поверхні – це криволінійна проекція ізоліній деформації елементів м’яза на поверхню шкіри при найменшому можливому прояві м’яза (як за амплітудою, так і за швидкістю), взятих із фіксованим кроком. Нормаль – це лінійний елемент поверхні, розташований дотично до ізолінії та перпендикулярно до градієнта деформації. Дотична – лінійний елемент поверхні, розташований на дотичній до поверхні шкіри та перпендикулярно до ізолінії.

Розклад поля деформацій елементів м’яза за напрямками

Можна виділити три різновиди м’я-

зів та відповідних впливів, які виникають під час скорочення (рис. 2):

- м’яз із точковим вкрапленням (наприклад, м’яз зведення брів);
- м’яз або комбінація м’язів із лінійним вкрапленням (наприклад, лобний);
- м’яз або комбінація м’язів із еліптичним вкрапленням (м’яз ока і рота).

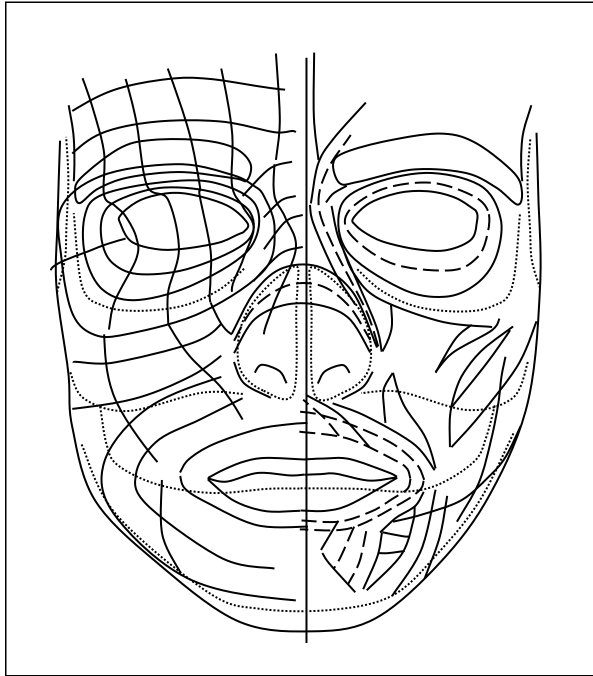


Рис. 2. Лінії поверхні шкіри (ліва половина рисунка) та відповідні елементи мімічно-м’язової структури (права половина)

Очевидно, що кожен із різновидів можна звести до другого (комбінація лінійних фрагментів дає еліпс), а другий – до першого (множину точок лінійного фрагмента можна звести до двох окремих точок, що лежать на кінцях цього фрагмента або до однієї точки, що лежить у центрі). Розглянемо кожен із видів деформації окремо, по мірі їх ускладнення.

Деформація від точкового елемента

При переміщенні точки закріплення м’яза на ΔL виникає скалярне поле деформацій м’яза, ізолінії якого направлені перпендикулярно до градієнта деформації. При цьому для складних проявів, зумовлених дією декількох м’язів, коли напрямок дії м’яза знаходиться під кутом, вісь м’яза може не співпадати за напрямком із градієнтом і відповідні ізолінії деформації самого м’яза, а саме їх проекції на поверхню шкіри, будуть паралельними лініям поверхні.

Деформація поверхні складатиметься з двох компонентів, які визначатимуться відповідно синусом і косинусом кута між віссю м’яза і напрямком деформації.

Оскільки, необхідно врахувати і деформацію м’яза в радіальному напрямку, можливі випадки, коли при великих значеннях кута дії м’яза і силі дії окремих м’язів елементи поверхні можуть зазнавати неприродних деформацій в одному з напрямків. Найбільш показовий приклад цього – зона переплетення м’язів піднімання кутиків губ, на яку одночасно можуть діяти 4-5 або більше м’язів.

Деформація від лінійного елемента фіксованої довжини

Більш складним випадком є лінійний елемент. Лінійний елемент передбачає, що м’яз рівномірно деформується по всій довжині. Очевидно, що при дії інших впливів на один з кінців лінійного елемента, розвертатиметься як напрямний вектор, так і змінюватиметься величина руху окремих елементів: при цьому поперечний переріз не змінюватиметься суттєво в напрямку найбільшої ширини м’яза, а величини деформації зростатимуть лінійно від вузлів з найменшим рухом м’яза до вузлів із найбільшим. У випадку рівномірної деформації по всій ширині м’яза лінійний елемент поводитиме себе як множина точкових елементів, що лежать на одній прямій, при цьому впливи під кутом вираховуватимуться для зон, що знаходяться по різні боки від крайніх точок закріплення м’яза.

Деформація від лінійного елемента змінної довжини

Найчастіше м’язи зазнають деформації як в дотичному напрямку, так і в радіальному/нормальному напрямку. По своїй суті при дії вони аналогічні як точковим елементам, так і лінійним, тому їх зручно розглядати як елемент, дія якого є суперпозицією дій лінійного елемента в нормальному напрямку та точкового елемента або елементів (якщо переміщують обидва кінці), який розташований на одному з кінців лінійного елемента.

Деформація від двох лінійних елементів, що шарнірно з'єднані один з одним

У моделі обличчя таких елементів всього два і розташовані вони зліва і справа від нижньої щелепи. Деформації від таких елементів дещо відмінні, оскільки їх модель побудована на моделі деформації м'язів скелету (рук, ніг), які пов'язані із кісткою, яка згинається в суглобі відносно інших частин скелету. Величина кута згину при цьому визначається як залежність від величини видовження м'яза (у випадку нижньої щелепи м'язів Masseter і Temporalis), а величина деформації поверхні в різних напрямках як залежність від величини кута згину кістки в суглобі, яка приводиться в дію даним м'язом.

Модель кругових м'язів обличчя

Найбільш складними для моделювання є рухи кругового м'яза рота та очей. Це викликане тим, що поверхня шкіри зазнає усіх видів деформації наведених вище – опускання і піднімання нижніх губ, збільшення або зменшення радіусу і ексцентриситету еліпсу, утвореного верхньою і нижньою губою та зміна відносного кута між губами при їх розведенні в боки, притисканні чи опусканні. Наявність такого різноманіття деформацій вимагає враховувати їх разом (рис. 3).

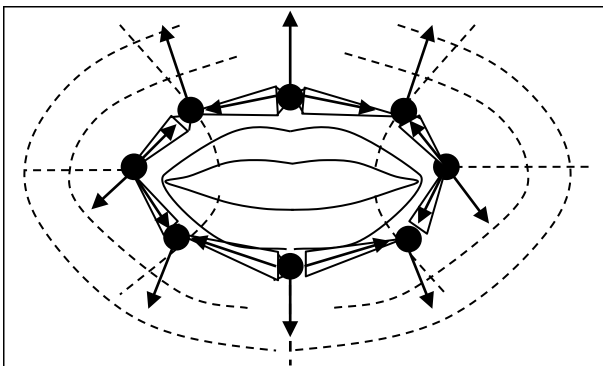


Рис. 3. Модель деформації кругових м'язів обличчя (на прикладі Orbicularis oris)

Піднімання середини верхньої губи і опускання середини нижньої губи може бути описане переміщенням трьох точкових елементів, поєднаних один з одним у лінійні елементи. Розтягнення губ у різні боки описується лінійними елементами, що мають здатність згинатися один відносно одного, а зміна діаметру отвору між губами – лінійними елементами, що мають здатність розтягуватися. Таким чином, будь-яка деформація в зоні рота, однаковою мірою, як і очей. описується суперпозицєю деформацій від трьох видів впливів.

Розклад деформацій на складову часу і масштабу

Для практичних задач існує необхідність опису не тільки динамічних станів, а й статичних. У переважній більшості випадків, що стосуються моделювання і розпізнавання мімічних проявів, стан міміки розглядається при найбільшому прояві (скороченні м'яза чи комбінації м'язів), при якому величину деформації поверхні шкіри можна формалізувати через функціональне перетворення від деформації м'яза. При цьому самі деформації (у точці закріплення) визначаються не реакцією на нервовий вплив, а аналітичною залежністю, отриманою експериментально. Це означає, що відображення дії нервового впливу, вираженого зміною потенціалу ΔE в скорочення поверхні шкіри ΔS можна зобразити як:

$$\Delta E \rightarrow \Delta S. \qquad (15)$$

Якщо проінтегрувати даний вираз по часу t, можна стверджувати, що для деяких моментів часу t_1 та t_2, які є відповідно початком і кінцем прояву (фронту або спаду), також справедливе перетворення:

$$(E_1, E_2) \rightarrow (S_1, S_2). \qquad (16)$$

Виходячи з того, що між S та E відсутня пряма залежність через різну розмірність величин як в фізичному плані, так і кількості ступенів вільності, необхідно обрати таке відображення, в якому фізичні розмірності співпадають. Це справедливо для відображення, що перетворює зміну потенціалу на деформацію поверхні дотику (через інші відображення, а саме видовження м'яза, зміни його поперечного перерізу і зміну площі поверхні самого м'яза).

Таким чином, відображення (15) розбивається на два окремі:

$$\Delta E \rightarrow \Delta S_n,\ \Delta S_n \rightarrow \Delta S, \qquad (17)$$

де ΔS – елемент поверхні обличчя, що за-

знає деформації від даного м'яза.

Оскільки, як було наведено вище, деформацію поверхні можна розглядати як деформацію за напрямками (змінами довжини і ширини елемента поверхні), то отриманий вираз зводиться до відображення рівняння оптичного потоку на поверхню обличчя, проінтегрувавши який по часу можна отримати шукані представлення (S_1, S_2) у вигляді:

$$(S_1, S_2) \to ((p_1, q_1), (p_2, q_2)), \quad (18)$$

де (p, q) - координати елемента поверхні для моменту часу t.

Розрахунок деформації елементів поверхні шкіри, що знаходяться поза зоною закріплення м'яза в поверхні шкіри

Оскільки м'яз має поверхню дещо меншу (наприклад, Risorus), ніж поверхня шкіри, яка деформується, то отримані лінії поверхні описують лише частину спостережуваної деформації та із деяким кроком. Елементи поверхні, що лежать поза зоною деформації м'яза, мають характеристики деформації інші, ніж у зоні деформації м'яза і їх деформація, по мірі збільшення відстані і кута дії м'яза, зменшується.

Визначення їх положення можливе трьома шляхами:

- з рівняння деформації м'яза/поверхні шкіри (що вимагає отримання розв'язків рівняння для кожного елемента поверхні);
- шляхом апроксимації аналітичною функцією руху всієї поверхні (що вимагає підбору параметрів, що зменшують помилку апроксимації);
- шляхом апроксимації функцією, експериментально обрахованою для кожного елемента поверхні окремо.

Для задачі просторового моделювання, а саме для розрахунку деформації поверхні шкіри, було запропоновано використати абстракцію – розтяжний лінійний елемент. Оскільки зміна видовження і лінійне переміщення кінців безпосередньо пов'язане із переміщенням елементів м'яза і його поверхні дотику, переміщення між моментами часу, в яких виконувалося спостереження, і дасть шукану зміну площі поверхні дотику м'яза.

Для визначення впливу цього переміщення на точки поверхні можна скористатися формалізацією (описом) переміщень і деформацій із теорії опору матеріалів із врахуванням відмінностей властивих саме поверхні шкіри (на порядки менший час і більша неоднорідність переміщень). Оскільки поверхня шкіри зазнає одразу великої кількості переміщень, формалізація їх у вигляді аналітичної формули, без розв'язку рівнянь, не є тривіальним процесом. Проте, сам механізм опису переміщень може із незначними змінами застосовуватися в задачі опису деформації поверхні шкіри та м'язів.

Для знаходження залежності величини зміни площі поверхні (відома величина) від величини переміщення окремого м'яза (невідома величина) будується епюра переміщень для заданого відрізку часу спостереження мімічної активності, яка розкладається за напрямками відносно головного напрямку деформації м'яза (вздовж осі) та нормалі (перпендикулярно осі руху м'яза).

Кінці відрізків часу спостереження виступають початковими і кінцевими (крайовими, якщо розглядається малий проміжок часу) умовами для рівняння руху точок поверхні обличчя. При цьому рівняння може бути розв'язане (чисельно або аналітично) як для всієї сукупності точок, так і для фіксованих напрямків деформації, а шукані деформації для інших точок перераховуються як деяка аналітична функція від радіусу дії та величини початкового впливу (деформації).

Синтез мімічних виразів з елементарних проявів

Особливістю мімічних проявів є те, що найчастіше мімічна активність спричиняється дією декількох м'язів одночасно. Ті мімічні прояви, що містять дію декількох мімічних м'язів називаються мімічними виразами, а ті, що викликані дією одного м'яза мікровиразами або мімічними морфемами.

Для того щоб синтезувати цілісні мімічні вирази з декількох мімічних морфем, можна використати властивості морфемної та морфемно-кісткової моделі,

представивши дію від декількох мімічних м’язів як суперпозицію цих дій. Нехай будь-який мімічний вираз v можна розкласти на суму лінійно незалежних мімічних компонентів K (якими можуть бути як окремі морфи, так і їх лінійні комбінації). Тоді шуканий вираз v можна отримати шля-хом підбору коефіцієнтів λ, таких, що

$$v = \lambda K, \quad (19)$$

$$\lambda = \{\lambda_i\}, K = \{k_i\} – \quad (20)$$

множини коефіцієнтів і мімічних морфем для всіх і відповідно.

Розглянемо об’єктно-орієнтовану модель мімічних проявів, побудовану на ієрархічній структурі наслідування. Нехай існує деякий мімічний вираз v0, такий, що $\lambda_i = 0$ для всіх λ_i і для всіх i. Даний мімічний вираз назвемо нейтральним мімічним виразом (станом спокою).

Тоді нехай для даного мімічного виразу v0 шляхом відображення

$$v0 \rightarrow v', \quad (21)$$

яке полягає в зміні деякої кількості ознак λ_j, для всіх j, можна утворити мімічний вираз v', який наслідує ознаки λ_g, для всіх g, такі, що $\lambda_g \cap \lambda_j = \varnothing$ для всіх g і j. Відображення (21), що перетворює вираз v0 в v', назвемо операцією наслідування.

Нехай існує множина лінійно незалежних мімічних виразів

$$V = \{v_i\}, \quad (22)$$

що наслідують властивості v_0:

$$v_0 \rightarrow V. \quad (23)$$

Тоді можна стверджувати, що для будь-якого v_i можна утворити ієрархічну послідовність наслідування лінійно незалежних похідних мімічних виразів

$$V^a = \{v^a_i\}, \quad (24)$$

отриману шляхом наслідування

$$V^{a-1} \rightarrow V^a, \quad (25)$$

де a – величина глибини наслідування.

Множину всіх мімічних виразів V, породжуваних безпосередньо від v0, назвемо базовими мімічними виразами, а всі елементи Vi, що наслідують кожен v_i – класами мімічних виразів.

Виходячи із ієрархічної структури наслідування похідних мімічних виразів і властивості наслідування, випливає, що будь-який мімічний вираз можна представити у вигляді комбінації лінійно незалежних мімічних виразів більш високого рівня ієрархії.

Висновки

У даній роботі запропоновано модель мімічно-м’язової структури, що пов’язує деформації поверхні обличчя із деформаціями м’язів та спостережувані елементи поверхні обличчя із областями поверхні обличчя із найбільшими деформаціями; запропоновано підхід до формалізації набору ознак мімічних проявів, що ґрунтуються на властивостях мімічно-м’язової структури, формалізованої в моделі деформацій мімічно-м’язової структури і моделі антропометричних точок обличчя; описано модель синтезу, що оперує набором антропометричних точок, множиною точок просторової моделі поверхні обличчя та зв’язками деформацій поверхні обличчя із рухами антропометричних точок.

Література

1. Astor, P.J., Adam, M.T.P., Jercic, P., Schaaff, K., Weinhart, C. (2013) Integrating Biosignals into Information Systems: A NeuroIS Tool for Improving Emotion Regulation. *Journal of Management Information Systems*. 30 (3), pp. 247–278. M.E. Sharpe, Inc.
2. Cambria, E. (2016) Affective Computing and Sentiment Analysis. *IEEE Intelligent Systems.* 31(2). pp. 102–107. Springer International Publishing AG. [Online]. Available: https://sentic.net/practical-guide-to-sentiment-analysis.pdf#page=9
3. Mehta, D., Siddiqui, M.F.H., Javaid, A.Y. (2018) Facial Emotion Recognition: A Survey and Real-World User Experiences in Mixed Reality. *Sensors,* 18(2), 416. [Online]. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5856132/
4. Smith, R. (2014) *The role of emotional and facial expression in synthesized sign language avatars. Master of Science (M.Sc.) thesis.* Blanchardstown: Blanchardstown Institute of Technology [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/299549995_The_role_of_emotional_and_facial_expression_in_synthesised_sign_language_avatars
5. Bartneck, C., Bartneck, L., Michael, J., Saerbeck, M. (2008) The Relationship Between Emotion Models and Artificial Intelligence. *SAB2008 Workshop on The Role of Emotion in Adaptive Behavior and Cognitive Robotics*. [Online]. Available: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1706/1706.09554.pdf
6. Foolen, A., Lüdtke, U.M., Racine, T.P., Zlatev, J. (2012) *Moving Ourselves, Moving Others: Motion*

and Emotion in Intersubjectivity, Consciousness and Language. Amsterdam: John Benjamins.
7. Ekman, P., Friesen, W. (1976) Measuring facial movement. *Environmental Psychology and Nonverbal Behavior*. 1 (1), pp. 56-75. [Online]. Available: http://www.paulekman.com/wp-content/uploads/2009/02/MeasuringFacial-Movement.pdf
8. Ping, H.Y., Abdullah, L.N., Sulaiman, P.S., Halin, A.A. (2013) Computer Facial Animation: A Review *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 5 (4). pp. 658-662. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236137009_Computer_Facial_Animation_A_Review
9. Wu, Y., Ji, Q. (2018) Facial Landmark Detection: a Literature Survey. *International Journal of Computer Vision* Springer US. pp. 1–28. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1805.05563.pdf
10. Крак, Ю.В., Лісняк, М.П., Кузнєцов, В.О., Тернов, А.С. (2013) Засоби комп'ютерної анімації для побудови системи моделювання української жестової мови. *Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): мат. міжнар. наук.-тех. конф. (14-17 травня 2013 р. Черкаси).* Черкаси: Маклаут, 379 с.
11. Крак, Ю.В., Кривонос, Ю.Г., Кузнецов, В.А. (2015) Моделирование эмоций в приложениях к проблемам жестовой коммуникации. *Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці та освіті: мат. міжнар. наук. сем. (29 червня – 3 липня 2015 року).* К.: СІК ГРУП Україна. С. 32-36.
12. Кузнецов, В.О., Крак, Ю.В., Куляс, А.І. (2017) До розробки системи розпізнавання елементів жестового мовлення із використанням систем бінокулярного комп'ютерного зору. *Системи та засоби штучного інтелекту: мат. наук. конф. (18 жовтня 2017).* Київ: ІПШІ «Наука і освіта». С.109-113.
13. Крак, Ю.В., Кузнецов, В.О. (2018) Аналіз технологій моделювання і ідентифікації стану обличчя і їх застосування в задачах передачі відеозображень. *Штучний інтелект та інтелектуальні системи (AIIS'2018): мат. міжнар. наук.-тех. конф.* Київ: ІПШІ „Наука і освіта".
14. Waters, K. (1987) A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression. *Proceedings of the 14st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH. Computer Graphics* 21(4). doi: 10.1145/37402.37405
15. Chadwick, J.E., Haumann, D.R., Parent, R.E. (1989) Layered Construction for Deformable Animated Characters. *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Conf. Proc.)*, pp. 243–252.
16. Waters, K., Frisbie, J. (1995) A Coordinated Muscle Model for Speech Animation. *Proc. Graphics Interface '95*, pp. 163–170.
17. Lee, Y., Terzopoulos, D., Waters, K. (1995). Realistic Modeling for Facial Animations. *Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Conf. Proc.)*, pp. 55–62.
18. Koch, R.M. et al. (1996) Simulating Facial Surgery Using Finite Element Models. SIGGRAPH. doi:10.1145/237170.237281

References

1. Astor, P.J., Adam, M.T.P., Jercic, P., Schaaff, K., Weinhart, C. (2013) Integrating Biosignals into Information Systems: A NeuroIS Tool for Improving Emotion Regulation. Journal of Management Information Systems. 30 (3), pp. 247–278. M.E. Sharpe, Inc.
2. Cambria, E. (2016) Affective Computing and Sentiment Analysis. IEEE Intelligent Systems. 31(2). pp. 102–107 Springer International Publishing AG. [Online]. Available: https://sentic.net/practical-guide-to-sentiment-analysis.pdf#page=9
3. Mehta, D., Siddiqui, M.F.H., Javaid, A.Y. (2018) Facial Emotion Recognition: A Survey and Real-World User Experiences in Mixed Reality. *Sensors*, 18(2), 416. [Online]. Available: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5856132/
4. Smith, R. (2014) The role of emotional and facial expression in synthesized sign language avatars. Master of Science (M.Sc.) thesis. Blanchardstown: Blanchardstown Institute of Technology [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/299549995_The_role_of_emotional_and_facial_expression_in_synthesised_sign_language_avatars
5. Bartneck, C., Bartneck, L., Michael, J., Saerbeck, M. (2008) The Relationship Between Emotion Models and Artificial Intelligence. SAB2008 Workshop on The Role of Emotion in Adaptive Behavior and Cognitive Robotics. [Online]. Available: https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1706/1706.09554.pdf
6. Foolen, A., Lüdtke, U.M., Racine, T.P., Zlatev, J. (2012). Moving Ourselves, Moving Others: Motion and Emotion in Intersubjectivity, Consciousness and Language. Amsterdam: John Benjamins.
7. Ekman, P., Friesen, W. (1976) Measuring facial movement. Environmental Psychology and Nonverbal Behavior. 1 (1), pp. 56-75. [Online]. Available: http://www.paulekman.com/wp-content/uploads/2009/02/MeasuringFacial-Movement.pdf
8. Ping, H.Y., Abdullah, L.N., Sulaiman, P.S., Halin A.A. (2013) Computer Facial Animation: A Review International Journal of Computer Theory and Engineering, 5 (4). pp. 658-662. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236137009_Computer_Facial_Animation_A_Review
9. Wu, Y., Ji, Q. (2018) Facial Landmark Detection: a Literature Survey. International Journal of Computer Vision Springer US, pp. 1–28. [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1805.05563.pdf
10. Krak, Yu.V., Lisnyak, M.P., Kuznetsov, V.O., Ternov, A.S. (2013) Zasobi komp'yuternoyi animatsiyi dlya pobudovi sistemi modelyuvannya ukrayinskoyi zhestovoyi movi. Obchislyuvalniy Intelekt (rezultati, problemi, perspektivi): mat. mizhnar. nauk.-teh. konf. (14-17 travnya 2013 r.). Cherkasi: Maklaut. 379 s.

11. Krak, Yu.V., Krivonos, Yu.G., Kuznetsov, V.A. (2015) Modelirovanie emotsiy v prilozheniyah k problemam zhestovoy kommunikatsii. Suchasni problemi Informatiki v upravlinni, ekonomitsi ta osviti: mat. mizhnar. nauk. sem. (29 chervnya – 3 lipnya 2015 roku). K.: SIK GRUP UKRAYINA. S. 32-36.
12. Kuznetsov, V.O., Krak, Yu.V., Kulyas, A.I. (2017) Do rozrobki sistemi rozpIznavannya elementiv zhestovogo movlennya iz vikoristannyam sistem binokulyarnogo komp'yuternogo zoru. Sistemi ta zasobi shtuchnogo intelektu: mat. nauk. konf. (18 zhovtnya 2017). Kyiv: IPShI «Nauka i osvita». S. 109-113.
13. Krak, Yu.V., Kuznetsov, V.O. (2018) Analiz tehnologiy modelyuvannya i identifIkatsiyi stanu oblichchya i yih zastosuvannya v zadachah peredachi video zobrazhen. Shtuchniy Intelekt ta Intelektualni sistemi (AIIS'2018): mat. mizhnar. nauk.-teh. konf. Kiyiv: IPShi „Nauka i osvita".
14. Waters, K. (1987) A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression. *Proceedings of the 14st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH. Computer Graphics* 21(4). doi: 10.1145/37402.37405
15. Chadwick, J.E., Haumann, D.R., Parent, R.E. (1989) Layered Construction for Deformable Animated Characters. *Computer Graphics (SIGGRAPH '89 Conf. Proc.)*, pp. 243–252.
16. Waters, K., Frisbie, J. (1995) A Coordinated Muscle Model for Speech Animation. *Proc. Graphics Interface '95*, pp. 163–170.
17. Lee, Y., Terzopoulos, D., Waters, K. (1995). Realistic Modeling for Facial Animations. *Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Conf. Proc.)*, pp. 55–62.
18. Koch, R.M. et al. (1996) Simulating Facial Surgery Using Finite Element Models. SIGGRAPH. doi:10.1145/237170.237281.

RESUME

Iu.V. Krak, V.O. Kuznetsov

Analysis and synthesis of parametric models for investigation of emotional facial expressions on the human face

Facial expressions play an important role in many areas of research, among which artificial intelligence, psychology, medicine should be highlighted. During the development of human-machine interfaces, facial expressions are considered as a means of communication. The development of such interfaces requires the means of formalizing the facial expressions for the correct recognition and their modeling with the help of spatial models.

One of the problems in the synthesis of emotional facial expressions with the help of spatial models of the head is the construction of strain patterns that relate changes in the mimic muscular structure of the face and the surface of the skin through certain parameters or functional dependencies.

There are two basic directions for formalizing these changes – in the form of physical models that describe changes in the form of differential equations or as a set of parameters.

In this paper an attempt is made to systematize these two approaches in one model. For this purpose, an analysis of the transformation process of the deformation of the individual muscle into facial expressions and their indirect measurement by means of image fixation (photo / video camera) by a sequence of frames describing the reaction of the mechanical system to the nerve impulse and its image, expressed through the optical flow on video image.

The analysis of the mimic-muscular structure has shown that the deformation of the set of points on the face can be calculated indirectly in two ways: from the deformation of the muscles and the skin surface at key (feature) points – the points of muscles' insertions in the skin or from isolines of deformation, in which the same value of deformation is observed.

The separate implementations of the synthesis model – operating with abstractions, such as: a point element of deformation, linear tensile and non-tensile elements are considered. As a result of the analysis, a synthesis model is proposed. It uses the abstraction "linear tensile element" which is oriented along the isoline of deformation and used to control the deformation of the surface of the virtual spatial model of the face.

Separately, the case of deformations in time is considered, as well as three methods for calculating the analytical function of the reaction of individual elements of the surface of the virtual spatial model. The object-oriented model of synthesis of mimic expressions from linearly independent mimic expressions and their components is proposed.

Надійшла до редакції 03.10.2018